

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：38005

研究種目：国際共同研究加速基金（帰国発展研究）

研究期間：2020～2023

課題番号：19K24686

研究課題名（和文）らせん構造を有するナノグラフェンおよびグラフェンナノソレノイドの合成と物性評価

研究課題名（英文）Synthesis and characterizations of nanographenes with helical structures and graphene nanosolenoids

研究代表者

成田 明光（Narita, Akimitsu）

沖縄科学技術大学院大学・有機・炭素ナノ材料ユニット・准教授

研究者番号：30870133

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 43,000,000円

研究成果の概要（和文）：グラフェンのナノ構造に相当する「ナノグラフェン」は、優れた光・電子物性を示すことから次世代炭素材料として期待されている。本研究では、典型的な平面構造のナノグラフェンとは一線を画した非平面のらせん構造を有するナノグラフェンや、その拡張によるグラフェンナノソレノイドの合成に挑戦し、様々な新奇構造の合成に成功した。特に、らせん構造に由来したキラリティーと近赤外発光を示す複数の非平面ナノグラフェンを合成し、キラル光物性に関する知見も得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

円偏光の検出や発光が可能なキラル材料は、セキュリティタグや三次元ディスプレイ等への応用が検討されており、本研究で得られたらせん構造を有する非平面ナノグラフェンの合成手法や構造物性に関する知見は、今後さらなる新奇構造の合成やより優れた物性を示す構造の設計に指針を与えるとともに、将来的には技術応用にも繋がること期待される。また、共同研究により特異な構造依存の励起状態ダイナミクスの解明や金属表面上での磁性グラフェンナノリボンの合成等、他分野への波及効果も得られた。

研究成果の概要（英文）："Nanographenes", corresponding to nanostructures of graphene, show promising optical and electronic properties and are considered as next-generation carbon materials for technological applications. This research aimed at the synthesis of nonplanar nanographenes with helical structures, which are distinct from typical planar nanographenes, as well as their extension toward graphene nanosolenoids. A variety of unprecedented nanographenes with novel structures were successfully synthesized. Near-infrared-emissive chiral nanographenes with helical substructures were also obtained, demonstrating unique photophysical properties and near-infrared chiroptical responses.

研究分野：物理有機化学、ナノカーボン化学、構造有機化学

キーワード：ナノカーボン 多環芳香族炭化水素 ナノグラフェン ヘリセン らせん構造 脱水素環化反応 キラリティー

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

グラフェンのナノ構造であるグラフェンナノリボン (GNR) やナノグラフェンとも呼ばれる大型の多環芳香族炭化水素 (PAH) は、その化学構造に依存した特異な物性や半導体としての特性から、次世代ナノカーボン材料として大きな注目を集めている。研究開始までに報告されていた GNR のほとんどが平面構造を持つものに対し、近年の理論研究により、コイル状構造のグラフェンナノリボン、すなわちグラフェンナノソレノイド (GNS) が、ナノサイズのインダクタとして応用可能であることが示唆され、GNS の合成と実験的な物性評価への期待が高まっていた。一方で、円偏光の検出や発光が可能なキラル材料は、セキュリティタグや三次元ディスプレイ等への応用可能性が提唱されており、キラルナノグラフェン、特にらせん構造を有するナノグラフェンの合成が盛んに報告され始めていた。

研究代表者は 2020 年 3 月にドイツからの帰国を予定していたが、新型コロナウイルス感染症に関する水際対策強化の影響で延期を余儀なくされ、マックス・プランク高分子研究所で一部研究を継続しつつ、2020 年 10 月に沖縄科学技術大学院大学にて本研究を開始した。本研究に従事する外国人博士研究員や留学生が入国できない等の影響は続いたが、研究室の立ち上げと合成実験の開始はスムーズに進んだ。

2. 研究の目的

本研究は、らせん構造を有するナノグラフェンや GNS の合成と物性評価を行い、新奇キラル材料群を創出するとともに、構造物性相関を明らかにすることを目的とした。らせん構造を有するナノグラフェンは非常に短い GNS に相当することから、前者の合成法の確立が後者の合成にも繋がることを考えた。さらに、電子・光物性やキラル物性を明らかにするとともに、将来的な技術応用への基礎となるような知見を得ることを目指した。また、日本で独立した研究室を立ち上げるとともに、新たに日本を拠点とした国際共同研究の継続とさらなる強化を図った。

3. 研究の方法

GNR を含めたグラフェンのナノ構造の作成法としては、リソグラフィー等によるトップダウン法が広く用いられているが、これらの手法では正確な化学構造や特定の物性を得ることが困難である。本研究では、有機合成化学の手法を用いたボトムアップ法により正確な化学構造を持つキラルナノグラフェンの多段階合成を行うとともに、その高分子化による GNS の合成を試みた。らせん構造の PAH としてはヘリセンが知られており、オルト位に縮環したベンゼン環の数 (n) に応じて [n]-ヘリセンと呼ばれる。らせん構造を有するナノグラフェンとして、平面構造のナノグラフェンにヘリセン部位を持たせた構造や、ヘリセンを π 拡張した構造を考案した。研究代表者がドイツでの研究を通して培ってきたナノグラフェンや GNR の合成経験を生かし、複数のオリゴアリーレンを前駆体として設計・合成し、塩化鉄 (III) や 2,3-ジクロロ-5,6-ジシアノ-p-ベンゾキノン (DDQ) と異なる有機酸の組み合わせを用いた酸化的脱水素環化反応により、ナノグラフェン構造の形成を検討した。

4. 研究成果

(1) fjord 型エッジ構造を有するナノグラフェンの合成と誘導放出や自然放射増幅光の観察：

fjord 型と呼ばれるエッジ構造は [5]-ヘリセン構造に相当し、非平面のらせん状構造を形成する。前駆体 **1** の脱水素環化反応を検討したところ、DDQ とスカンジウム (III) トリフラート ($\text{Sc}(\text{OTf})_3$)、及びトリフルオロメタンスルホン酸 (TfOH) を用いた反応条件により fjord 型エッジ構造を有する非平面ナノグラフェン、ジベンゾ [a, m] ジナフト [3, 2, 1-ef:1', 2', 3'-hi] コロネン (DBDNC) が得られた (図 1)¹⁾。DBDNC は強い赤色蛍光と大気下での比較的高い安定性を示し、発光デバイスやバイオイメージ等への応用が期待された。そこで、ミラノ工科大学 (イタリア) との共同研究により超高速過渡吸収分光測定を行ったところ、比較的長寿命の誘導放出が見出された。誘導放出はジグザグエッジを有する平面構造のナノグラフェンにおいても報告されているが、分子間相互作用によると考えられる消光が観察されていた。らせん状の非平面構造の導入により分子間相互作用が抑制され、誘導放出の長寿命化が可能になるという、今後レーザー等への応用研究に重要な知見が得られた。さらに、アリカンテ大学 (スペイン) との共同研究により、655nm と 700nm の 2 波長で同時に自然放射増幅光を示すという DBDNC の特異な光学物性が明らかになり、fjord 型エッジ構造がナノグラフェンの励起状態ダイナミクスに及ぼす大きな影響を示唆した。

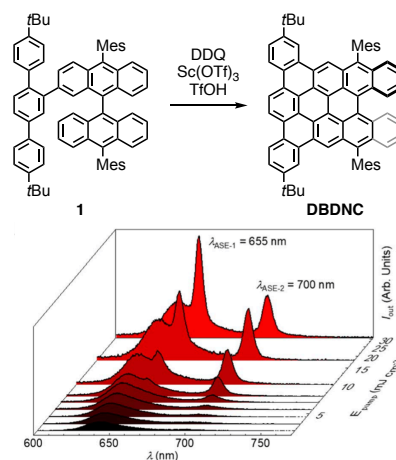


図 1 前駆体 **1** の脱水素環化による DBDNC の合成とその自然放射増幅光の観察¹⁾。

(2) 2つの fjord 型エッジ構造を有するナノグラフェンの合成と近赤外キラル光物性の評価：

DBDNC の合成で得られた知見に基づいて、前駆体 **2** の脱水素環化反応により、ヘキサベンゾペリヘキサセン (HBPH) の合成に成功した (図 2 a)²⁾。HBPH は 2つの fjord 型エッジを有するナノグラフェンであり、分子構造内に 2つの [5]ヘリセン部位を有するダブル[5]ヘリセンにも相当する。fjord エッジ上に *tert*-ブチル基を導入しエナチオマーを安定化することで、キラルカラムを用いた高速液体クロマトグラフィー (キラル HPLC) による室温での光学分割が可能となった。円二色性分散 (CD) が近赤外領域の約 800nm まで観察され、616nm において 0.017 という比較的大きな異方性因子が示された。また、HBPH は 798nm に蛍光極大を示し、近赤外発光材料としても応用も考えられる。

さらに、前駆体 **3** の脱水素環化反応により、テトラベンゾジナフトピラントレン (TBDNP) の合成にも成功した (図 2 a)³⁾。TBDNP は 805nm に吸収極大、820nm に蛍光極大を示し (図 2 b)、HBPH と比較して蛍光極大波長が長波長側に 22nm シフトした。さらに CD 測定により 574nm における異方性因子が 0.032 と決定され、HBPH との比較も含めて今後のキラル材料の設計にも関わる構造物性相関の知見が得られた。マックス・プランク高分子研究所 (ドイツ) との共同研究を通して、TBDNP が超解像顕微鏡法の一つである単一分子局在化顕微鏡法に応用可能であることも明らかになっており、超解像イメージング用の新規近赤外蛍光プローブの開発への展開も期待される。また、前駆体 **1-3** で共通の 9,9'-ビアントラセン置換体を基本構造として、インデノ基を縮環されることにより、非常に高いジラジカル性を示し、開殻一重項状態と開殻三重項状態がほとんど縮退した基底状態を有する新奇磁性分子の開発にも繋がった⁴⁾。

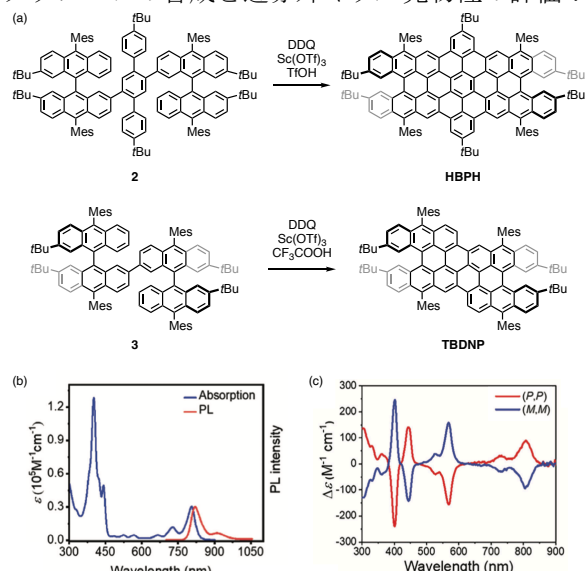


図 2 (a) 前駆体 **2** と **3** の脱水素環化による HBPH と TBDNP の合成。TBDNP の (b) 紫外可視近赤外吸収・発光スペクトルと (c) CD スペクトル³⁾。

(3) 大きならせん構造を有するナノグラフェンの合成と近赤外発光やキラル光物性の評価：

HBPH や TBDNP より大きならせん構造を有するナノグラフェンとして、 π 拡張型のダブル [9]ヘリセンに相当する構造 (D9H) の合成に取り組んだ (図 3)⁵⁾。適切に設計したオリゴアリーレン前駆体の脱水素環化反応を行い、D9H の生成を質量分析により確認、副生物とあわせて HPLC による単離に成功した。さらに、NMR と X 線結晶構造解析により D9H の構造を決定した (図 3 b)。一方で、副生物の 1 つについても単結晶を得ることに成功し、[7]ヘリセン部位と [9]ヘリセン部位を有するダブルヘリセン (H7H9) が転移反応を経て生成したことを X 線結晶構造解析により明らかにした。

H7H9 が 635nm を極大として約 600nm から約 800nm の領域で赤色発光を示したのに対し、D9H は 175nm 長波長側にシフトした 810nm を極大とし、約 750nm から約 1100nm に至る幅広い近赤外発光を示した (図 3 c)。キラル HPLC による光学分割にも成功し、CD 測定により異方性因子は H7H9 が 582nm において 0.008、D9H は 590nm において 0.019 と決定された。また、サイクリックボルタンメトリーにより D9H は 4つの可逆な酸化波と 2つの可逆な還元波を示し、レドックス材料としての可能性も示唆された。さらに、D9H のより詳細な光物性や励起状態ダイナミクスを明らかにするべく、IMDEA ナノサイエンス研究所 (スペイン) との共同研究により時間分解発光分光や超高速過渡吸収分光の測定を進めている。

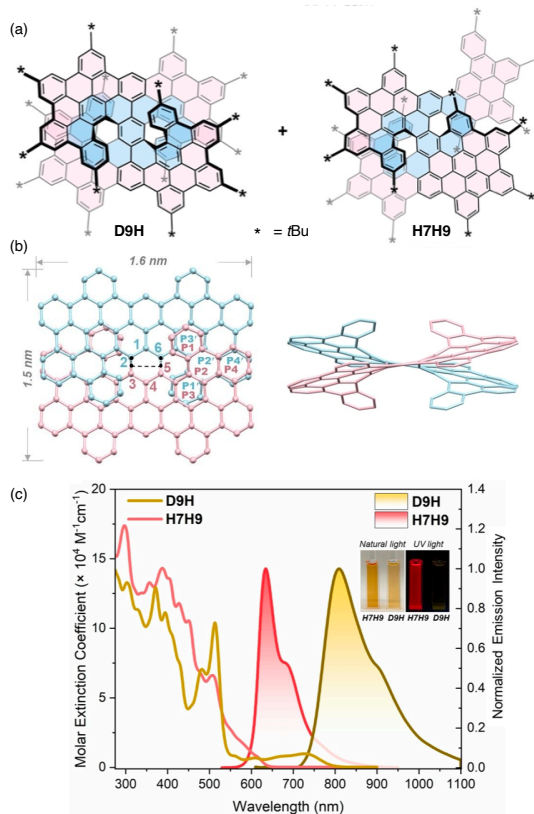


図 3 (a) D9H と H7H9 の構造、(b) D9H の結晶構造、(c) D9H と H7H9 の紫外可視近赤外吸収・発光スペクトル⁵⁾。(文献 5 より許可を得て転載)

(4) PAHのキラル二量体の合成と対称性の破れを伴う分子内電荷移動の観察：らせん状ナノグラフェンやグラフェンナノソレノイドの前駆体への拡張を志向して、ベンゾ[*rst*]ペンタフェン (BPP) の二量体やオリゴマーの合成検討を行った。BPP の二量体、5,5'-ビベンゾ[*rst*]ペンタフェンに2つのメシチル基を導入した誘導体 (BBPP) の光物性をコーネル大学 (アメリカ) とボローニャ大学 (イタリア) との共同研究により調べたところ、励起状態において対称性の破れを伴う分子内電荷移動を示すことが明らかとなった (図4)⁶⁾。極性の異なる溶媒中で紫外可視吸収スペクトルにほとんど変化が見られない一方で、蛍光スペクトルが極性の高い溶媒中で長波長側にシフトするとともに、蛍光寿命も長くなったことから、光誘起で励起状態において電荷移動が起こっていることが示唆された (図4b)。さらに、高極性のベンズニトリル溶液中における超高速過渡吸収分光測定で、BBPP のラジカルアニオンの紫外可視吸収スペクトルとよく一致する結果が得られ、励起状態における対称性の破れを伴った分子内電荷移動の証明へと至った。さらに、BBPP は軸不斉を有し、キラル HPLC による室温での光学分割にも成功した。CD 測定により異方性因子は 424nm において 0.0056 であった (図4c)。一方で、BPP に2つの電子供与性の置換基を導入することでも、溶媒の極性に応じて励起状態における対称性の破れを伴った分子内電荷移動が起こることも明らかとなり⁷⁾、特異な光物性を有する新規機能性ナノカーボン分子群の開拓へと繋がると期待される。

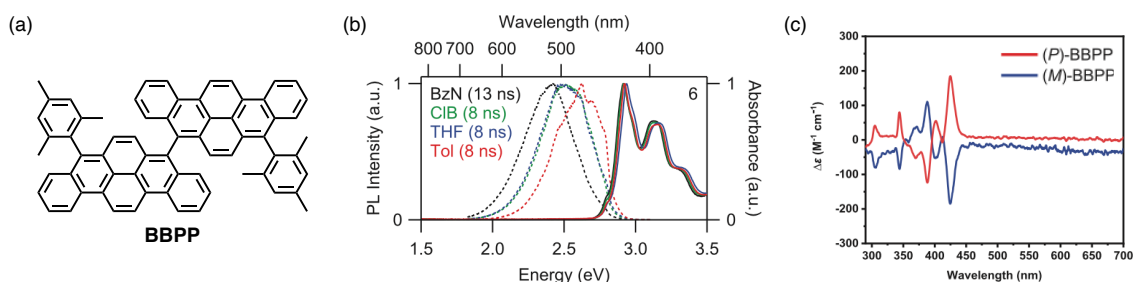


図4 (a)BBPP の構造、(b)ベンズニトリル (BzN)、クロロベンゼン (ClB)、テトラヒドロフラン (THF)、及びトルエン (Tol) 溶液中での紫外可視吸収・蛍光スペクトルと蛍光寿命、(c)CD スペクトル⁶⁾。

(5) らせん構造を有する GNR の金属表面合成検討と転移反応による磁性 GNR の生成：

適切に置換した PAH 誘導体を前駆体として用いて、超高真空下、金属表面上で GNR やナノグラフェンを合成し、超分解能の走査型トンネル顕微鏡 (STM) や原子間力顕微鏡 (AFM) により生成物の化学構造を直接可視化する研究が近年盛んに進められている。走査型トンネル分光法 (STS) により、得られた GNR やナノグラフェンの電子物性を特定の位置において評価することも可能となる。らせん構造を有する GNR の金属表面合成を志向して、2つのブロモ基を有するアントラセニルテトラフェン誘導体 **4** を前駆体として合成した (図4a)⁸⁾。物質・材料研究機構との共同研究により、前駆体 **4** を超高真空下、金 (111) 基板表面上で 300°C まで加熱したところ、3次元部位を

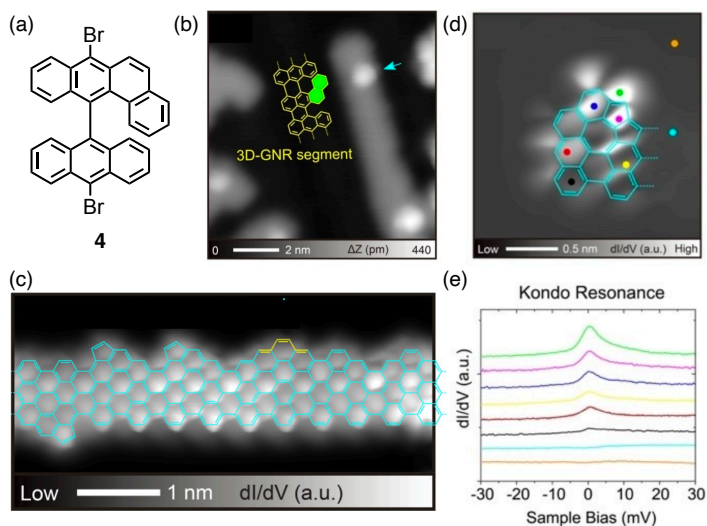


図4 (a)前駆体 **4** の構造、(b)3次元部位を有する GNR の STM 像とその化学構造、(c)平面化した GNR と (d)非平面末端の超分解像 STM 像と化学構造、(e) d に示す位置での STS 測定結果⁸⁾。

有する GNR が STM により観察された (図4b)。しかしながら、GNR の大部分は平面構造となっていることが明らかとなった。探針の先端を一酸化炭素分子で修飾してさらに解像度を上げた測定により、GNR のエッジ上に5員環や6員環が縮環した構造が観察され (図4c)、3次元構造から転移反応により熱力学的により安定な平面構造へと至ったことが示唆された。一方で、GNR 末端には特異な非平面構造が確認され、前例の無い転移反応により5員環や7員環が形成されたことが見出された (図4d)。さらに、STS 測定により非平面末端において近藤共鳴状態が観察され (図4e)、金基板上で磁性を示す GNR が得られたことが明らかとなった。今後磁性を有する新規ナノカーボン材料の開拓にも繋がると期待される。

(6) GNS の合成：マックス・プランク高分子研究所（ドイツ）との継続的な共同研究を通して、適切に設計したオリゴアリーレン前駆体の脱水素環化反応により GNS と考えられる試料が得られ、時間分解テラヘルツ分光により GNR に類似した半導体特性を確認できたが、構造解析が困難であり、本研究期間中に完了することは叶わなかった。バーゼル大学（スイス）との共同研究により、直近では GNS らしい構造体の STM 像も得られており、今後研究を継続していく。

<引用文献>

- ① X. Xu, G. Serra, A. Villa, R. Muñoz-Mármol, S. Vasylevskiy, M. Gadea, A. Lucotti, Z. Lin, P. G. Boj, R. Kabe, M. Tommasini, M. Á. Díaz-García, F. Scotognella, G. M. Paternò, A. Narita, Synthesis of zigzag- and fjord-edged nanographene with dual amplified spontaneous emission. *Chem. Sci.* **2022**, *13*, 13040-13045.
- ② X. Xu, R. Muñoz-Mármol, S. Vasylevskiy, A. Villa, G. Folpini, F. Scotognella, G. Maria Paternò, A. Narita, Synthesis of Bioctacene-Incorporated Nanographene with Near-Infrared Chiroptical Properties. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2023**, *62*, e202218350.
- ③ X. Xu, Q. Yang, H. Zhao, S. Vasylevskiy, M. Bonn, X. Liu, A. Narita, Chiral Nanographene-Based Near-Infrared Fluorophore with Self-Blinking Properties. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, *34*, 2308110.
- ④ X. Xu, S. Takebayashi, H. Hanayama, S. Vasylevskiy, T. Onishi, T. Ohto, H. Tada, A. Narita, 6,6'-Biindeno[1,2-*b*]anthracene: An Open-Shell Biaryl with High Diradical Character. *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, *145*, 3891-3896.
- ⑤ J. Tan, X. Xu, J. Liu, S. Vasylevskiy, Z. Lin, R. Kabe, Y. Zou, K. Müllen, A. Narita, Y. Hu, Synthesis of a π -Extended Double [9]Helicene. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2023**, *62*, e202218494.
- ⑥ X. Xu, S. Gunasekaran, S. Renken, L. Ripani, D. Schollmeyer, W. Kim, M. Marcaccio, A. Musser, A. Narita, Synthesis and Characterizations of 5,5'-Bibenzo[*rst*]pentaphene with Axial Chirality and Symmetry-Breaking Charge Transfer. *Adv. Sci.* **2022**, *9*, 2200004.
- ⑦ X. Xu, A. L. Vonder Haar, R. Yoshioka, Q. Zhang, S. Vasylevskiy, A. J. Musser, A. Narita, Solvent-tunable exciton-charge transfer mixed state enhances emission of functionalized benzo[*rst*]pentaphene through symmetry breaking. *Chem. Commun.* **2023**, *59*, 720-723.
- ⑧ X. Xu, K. Sun, A. Ishikawa, A. Narita, S. Kawai, Magnetism in Nonplanar Zigzag Edge Termini of Graphene Nanoribbons. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2023**, *62*, e202302534.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件/うち国際共著 10件/うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Xu Xiushang, Yang Qiqi, Zhao Hao, Vasylevskyi Serhii, Bonn Mischa, Liu Xiaomin, Narita Akimitsu	4. 巻 34
2. 論文標題 Chiral Nanographene Based Near Infrared Fluorophore with Self Blinking Properties	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2308110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202308110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Zhou Long, Liu Haoliang, Tan Jingyun, Liu Chao, Cao Xiao Yu, Narita Akimitsu, Hu Yunbin	4. 巻 17
2. 論文標題 Double Thia/sulfone[7]helicenes with Controlled Photophysical and Chiroptical Properties by Heteroatom Variation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemistry An Asian Journal	6. 最初と最後の頁 e202200336
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asia.202200336	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Xu Xiushang, Serra Gianluca, Villa Andrea, Munoz Marmol Rafael, Vasylevskyi Serhii, Gadea Marcos, Lucotti Andrea, Lin Zensen, Boj Pedro G., Kabe Ryota, Tommasini Matteo, Diaz-Garcia Maria A., Scotognella Francesco, Paterno; Giuseppe Maria, Narita Akimitsu	4. 巻 13
2. 論文標題 Synthesis of zigzag- and fjord-edged nanographene with dual amplified spontaneous emission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 13040 ~ 13045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2sc04208h	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Xu Xiushang, Vonder Haar Amy L., Yoshioka Rengo, Zhang Qizheng, Vasylevskyi Serhii, Musser Andrew J., Narita Akimitsu	4. 巻 59
2. 論文標題 Solvent-tunable exciton-charge transfer mixed state enhances emission of functionalized benzo[<i>rst</i>]pentaphene through symmetry breaking	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 720 ~ 723
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2cc05369a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Xu Xiushang, Munoz Marmol Rafael, Vasylevskiy Serhii, Villa Andrea, Folpini Giulia, Scotognella Francesco, Maria Paterno; Giuseppe, Narita Akimitsu	4. 巻 62
2. 論文標題 Synthesis of Biocacene Incorporated Nanographene with Near Infrared Chiroptical Properties	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 e202218350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202218350	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Xu Xiushang, Takebayashi Satoshi, Hanayama Hiroki, Vasylevskiy Serhii, Onishi Takatsugu, Ohto Tatsuhiko, Tada Hirokazu, Narita Akimitsu	4. 巻 145
2. 論文標題 6,6 -Biindeno[1,2-b]anthracene: An Open-Shell Biaryl with High Diradical Character	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 3891 ~ 3896
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.2c13890	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tan Jingyun, Xu Xiushang, Liu Jun, Vasylevskiy Serhii, Lin Zesen, Kabe Ryota, Zou Yingping, Muellen Klaus, Narita Akimitsu, Hu Yunbin	4. 巻 62
2. 論文標題 Synthesis of a Extended Double [9]Helicene	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 e202218494
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202218494	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Xu Xiushang, Sun Kewei, Ishikawa Atsushi, Narita Akimitsu, Kawai Shigeki	4. 巻 62
2. 論文標題 Magnetism in Nonplanar Zigzag Edge Termini of Graphene Nanoribbons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 e202302534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202302534	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Paterno Giuseppe Maria, Goudappagouda, Chen Qiang, Lanzani Guglielmo, Scotognella Francesco, Narita Akimitsu	4. 巻 9
2. 論文標題 Large Polycyclic Aromatic Hydrocarbons as Graphene Quantum Dots: from Synthesis to Spectroscopy and Photonics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2100508 ~ 2100508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202100508	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhao Hao, Xu Xiushang, Zhou Long, Hu Yunbin, Huang Yiming, Narita Akimitsu	4. 巻 18
2. 論文標題 Water Soluble Nanoparticles with Twisted Double [7]Carbohelicene for Lysosome Targeted Cancer Photodynamic Therapy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2105365 ~ 2105365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202105365	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Xu Xiushang, Gunasekaran Suman, Renken Scott, Ripani Lorenzo, Schollmeyer Dieter, Kim Woojae, Marcaccio Massimo, Musser Andrew, Narita Akimitsu	4. 巻 Early View
2. 論文標題 Synthesis and Characterizations of 5,5 Bibenzo[rst]pentaphene with Axial Chirality and Symmetry Breaking Charge Transfer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Science	6. 最初と最後の頁 2200004 ~ 2200004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/advs.202200004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tan Jingyun, Zhang Guanghui, Ge Congwu, Liu Jun, Zhou Long, Liu Chao, Gao Xike, Narita Akimitsu, Zou Yingping, Hu Yunbin	4. 巻 24
2. 論文標題 Electron-Deficient Contorted Polycyclic Aromatic Hydrocarbon via One-Pot Annulative Extension of Perylene Diimide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Organic Letters	6. 最初と最後の頁 2414 ~ 2419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.orglett.2c00690	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計20件(うち招待講演 19件/うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Synthesis of Molecular Nanographenes and Graphene Nanoribbons with Magnetic Properties
3. 学会等名 8th International Conference on Superconductivity and Magnetism (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Synthetic Exploration of Functional Nanographenes for Photonic Applications
3. 学会等名 243rd ECS Meeting (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Molecular Design and Chemical Synthesis of Carbon Nanomaterials
3. 学会等名 2023 Japan-America Frontiers of Engineering Symposium (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Synthesis and Peripheral Functionalization of Highly Luminescent Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
3. 学会等名 CEMS Topical Meeting on Chemistry of pi-Conjugated Materials (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Bottom-Up Synthesis of Atomically Precise Molecular Nanographenes and Graphene Nanoribbons with Magnetic Properties
3. 学会等名 The 65th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成田明光
2. 発表標題 次世代ナノカーボン材料の精密分子合成と多彩な物性
3. 学会等名 一般社団法人 持続社会発展のための機能化学研究委員会 第8回研究講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Synthesis and Functionalization of Atomically Precise Nanographenes toward Photonic Applications
3. 学会等名 3rd International Symposium on Dynamic Exciton (ISDyEx) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Synthesis of Atomically Precise Graphene Nanostructures and Modulation of Their Photophysical Properties
3. 学会等名 SIPS2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成田明光
2. 発表標題 グラフェン量子ドットの精密合成と多彩な物性
3. 学会等名 第20回酸化グラフェン研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Synthesis and Characterizations of Highly Fluorescent Nanographene Molecules
3. 学会等名 241st ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Synthesis of Functional Polycyclic Aromatic Hydrocarbons with Unusual Structures and Properties
3. 学会等名 Heron 9 Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Solution Synthesis and Edge Functionalization of Molecular Graphene Nanostructures
3. 学会等名 Future Leaders Network for Nanoscale Energy Harvesting incubator workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Synthesis and Functionalization of Highly Luminescent Polycyclic Aromatic Hydrocarbons toward Photonic Applications
3. 学会等名 The 11th Singapore International Chemistry Conference (SICC11) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成田明光
2. 発表標題 低次元炭素材料のボトムアップ合成と多彩な物性
3. 学会等名 第58回炭素材料夏季セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成田明光
2. 発表標題 グラフェン量子ドットやグラフェンナノリボンのボトムアップ精密合成と物性評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Synthetic Exploration of Precision Graphene Nanostructures and Emerging Photonic Applications
3. 学会等名 Virtual Workshop Advanced Precision Carbon Nanostructures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akimitsu Narita
2. 発表標題 Bottom-up Synthesis and Functionalization of Graphene Quantum Dots with Atomically Precise Structures
3. 学会等名 nanoGe Spring Meeting 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	Max Planck Society	Johannes Gutenberg University Mainz		
イタリア	Politecnico di Milano	Istituto Italiano di Tecnologia	University of Bologna	
米国	Cornell University			
中国	Central South University	Xiamen University	Chinese Academy of Sciences	
スペイン	Universidad de Alicante	IMDEA Nanoscience Institute		
スイス	University of Basel			
ベルギー	KU Leuven			
フランス	ENS Paris Saclay			